

С. И. Степанов*, М. П. Пузанов, Е. Н. Попова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**s.i.stepanov@urfu.ru*

Научные руководители – проф., д-р техн. наук *Ю. Н. Логинов*, проф., д-р техн. наук
М. Л. Лобанов

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОЦЕНКЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ

Проведен динамический механический анализ (ДМА) тонкой листовой трансформаторной стали. Показано, что при нагреве до 550 °С на кривой изменения динамического модуля упругости имеются перегибы: два необратимых в интервале температур 200–400 °С и один обратимый вблизи 500 °С. Установлено, что максимум на температурной зависимости модуля упругости при 320 °С вызван окислением образца.

Ключевые слова: трансформаторная сталь, модуль упругости, динамический механический анализ, напряжения.

S. I. Stepanov, M. P. Puzanov, E. N. Popova

DYNAMICAL MECHANICAL ANALYSIS OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF GO STEEL

Dynamical mechanical analysis (DMA) of ultrathin transformer sheet steel have been performed. A number of turning point were observed in the dynamical modulus vs. temperature dependence during heating at 550 °C: two irreversible in the temperature range of 200–400 °C and one stable at 500 °C. The hump on the modulus curve at 320 °C was due to the oxidation of the specimen.

Keywords: transformer steel, elastic modulus, dynamical mechanical analysis, stresses.

В работах [1, 2] была показана эффективность применения динамического механического анализа (ДМА) для определения структурного перехода от нагартованного состояния к рекристаллизованному. За основу была принята концепция перехода одного текстурного состояния в другое при температуре начала рекристаллизации. Метод ДМА также может применяться для определения упругих характеристик материала, деформируемого при температурах, близких к нижней границе температурного диапазона возврата. Так, при холодной прокатке качественной трансформаторной стали требуется поддерживать температурный режим полосы в интервале от 185 до 230 °С

[3, 4]. При расчете напряженно-деформированного состояния полосы в данном температурном режиме прокатки необходимо учитывать температурное изменение упругих свойств металла в очаге деформации.

Определение модуля упругости осуществляли на приборе DMA 242C NETZSCH. Динамический механический анализ основан на измерении реакции образца при приложении к нему осциллирующей, то есть периодически изменяющейся по заданному закону, нагрузки. Образцы деформировали по схеме трехточечного изгиба (рис. 1) в инертной атмосфере аргона.

Материалом исследования служили тонкие листы из электротехнической трансформаторной стали промышленного производства. Электротехническая трансформаторная сталь представляет из себя кремнистую сталь с уникальными магнитными свойствами вдоль направления прокатки и используется в производстве сердечников различных преобразующих устройств. Производство трансформаторной стали включает в себя выплавку, горячую прокатку, травление, двукратную холодную прокатку с промежуточным рекристаллизационным отжигом, высокотемпературный отжиг и нанесение электроизоляционного покрытия.

Испытания проводили для образцов стали в толщине 0,70 мм после первой холодной прокатки в отожженном состоянии. Холодная прокатка осуществлялась на непрерывном стане за четыре прохода с суммарным относительным обжатием 72 %. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости при прокатке использовалась водно-масляная эмульсия. Отжиг холоднокатаной стали осуществлялся в башенной печи с предварительным химическим обезжириванием. Термическая обработка стали происходила в режиме обезуглероживания при температуре 840 °С и в атмосфере азотного защитного газа с заданными параметрами влажности.

Из отожженных стальных листов были подготовлены плоские образцы длиной 20 мм, шириной 4 мм. Образцы дополнительно обезжиривались с применением спирта и далее испытывались по схеме трехточечного изгиба при нагрузке 9 Н. Нагрев до 550 °С осуществляли со скоростью 20 °С/мин. Частота нагружения составляла 1 Гц.

Определение модуля динамической упругости E основано на следующей зависимости:

$$E = \frac{l^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{F}{a},$$

где l – расстояние между опорами; F – динамическая нагрузка (сила); h – высота образца; a – динамическое смещение; b – ширина образца.

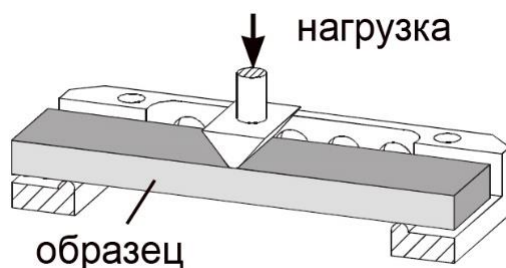


Рис. 1. Схема нагружения в приборе ДМА для трехточечного изгиба

Кривая 1 (рис. 2) соответствует нагреву образца в отожженном состоянии. На кривой наблюдается три ярко выраженных перегиба. Минимум при температуре около 280 °С, максимум в районе 320 °С и плавный перегиб вблизи 500 °С. Несмотря на использование инертной атмосферы, образец был покрыт окалиной. Для проверки влияния окисления поверхности на результаты измерений был проведен повторный нагрев, который соответствует кривой 2 (рис. 2). На данной температурной зависимости модуля упругости фиксируется только высокотемпературный эффект в районе температуры 500 °С. Исследуемый образец был зачищен от окисленного слоя при помощи наждачной бумаги и подвергнут дополнительному нагреву (кривая 3, рис. 2). При этом на температурной зависимости модуля динамической упругости наблюдался только максимум при температуре 320 °С. Данный эффект, по-видимому, связан с процессом окисления поверхности образца.

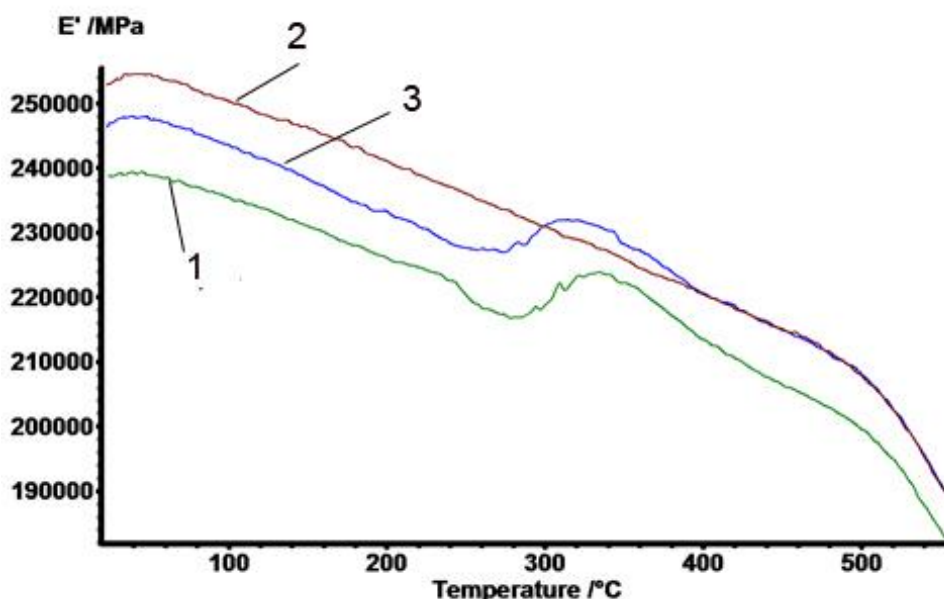


Рис. 2. Зависимость модуля упругости отожженной трансформаторной стали от температуры по результатам ДМА

Таким образом, методом ДМА установлено, что при нагреве до 550 °С на кривой изменения динамического модуля упругости трансформаторной стали имеются перегибы: два необратимых в интервале температур 200–400 °С и один обратимый вблизи 500 °С. Установлено, что максимум на температурной зависимости модуля упругости при 320 °С вызван окислением образца.

Работа выполнена в рамках проектной темы Минобрнауки РФ (задание № 11.1465.2014/К).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекристаллизация нагартованной меди с позиции динамического механического анализа / С. Л. Демаков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 7. С. 36–39.
2. Демаков С. Л., Логинов Ю. Н., Илларионов А. Г., Степанов С. И., Иванова М. А. Способ изучения первичной рекристаллизации. Патент на изобретение RUS 2496103. Приоритет от 01.03.2012.
3. Пименов В. А., Бабушко Ю. Ю., Бахтин С. В. Разработка технологии реверсивной холодной прокатки тонкого высококремнистого проката на основе математической модели энергосиловых и тепловых процессов // Сталь. 2014. № 10. С. 35–39.
4. Расчет теплового режима процесса холодной прокатки полос из электротехнической стали на реверсивном стане с использованием балансной математической модели / Э. А. Гарбер [и др.] // Производство проката. 2013. № 6. С. 2–10.